

한파 적응대책의 한랭질환 환자 발생 저감 효과 분석: Two-part 모형을 중심으로

이상준* · 김채리** · 윤희연***†

*서울대학교 조경·지역시스템공학부 학사과정학생, **서울대학교 농업생명과학연구원 연구조교수, ***서울대학교 조경·지역시스템공학부 교수

The impact of cold wave adaptation policies on cold-related illness incidence: A two-part modeling approach

Lee, Sangjun* · Kim, Cherry** and Yoon, Heeyeun***†

*Undergraduate Student, Dept. of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

**Research Associate Professor, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

***Professor, Dept. of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

This study empirically evaluates the effectiveness of cold wave adaptation policies, specifically emergency warning messages and designated cold wave shelters, in reducing cold-related illnesses in South Korea. Using monthly panel data from 229 municipalities during the winter seasons (November - March) from 2014 to 2023, we applied a two-part model to estimate policy effects separately on (1) the probability of cold-related illness occurrence and (2) the conditional number of patients given illness occurrence. Heterogeneity analyses based on regional aging levels and urban - rural classification were conducted to further examine spatial variation in adaptation effectiveness. The results indicated that warning messages significantly reduced both the probability of illness occurrence and the conditional number of patients. However, their marginal effectiveness diminished as issuance frequency increased, suggesting a nonlinear relationship consistent with information fatigue. In contrast, shelter capacity did not significantly affect the probability of illness occurrence but reduced the number of patients once illness occurred, suggesting that shelters primarily function as post-occurrence mitigation measures rather than preventive tools. Heterogeneity analyses showed that the effectiveness of both policies weakened in highly aged regions and that shelter effects were relatively limited in urban areas. These findings suggest that adaptation effectiveness depends not only on the provision of physical facilities or information but also on how policies are implemented within structurally differentiated regional contexts. In rapidly aging areas, adaptation strategies should therefore incorporate measures to improve accessibility and effective use, including mobility support and targeted communication approaches.

Key words : Cold Wave, Climate Change Adaptation, Cold-Related Illness, Warning Message, Heating Shelters

1. 서론

기후변화로 인해 지구 평균기온은 상승하고 극한 기상 현상의 변동성도 커지고 있다(Clarke et al., 2022; Coumou and Rahmstorf, 2012; Wu et al., 2025). 최근 연

구는 기온 변동성이 증가할수록 급속적이고 강한 한파의 발생 가능성이 높아짐을 시사하며, 한파는 폭염과 더불어 중요한 기후 위험 요인으로 부각되고 있다(Cohen et al., 2021). 이는 기존의 기후 조건에 적응해 온 사회 시스템에 새로운 부담으로 작용할 수 있음을 의미한다. 한파는 저

†Corresponding author : hyoon@snu.ac.kr (1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea. Tel. +82-2-880-4876)

ORCID 이상준 0009-0003-2711-3953
김채리 0000-0002-8484-0415

윤희연 0000-0003-4446-7692

체온증, 동상과 같은 한랭질환을 직접적으로 유발할 수 있어, 지역 수준에서의 관리와 정책적 대응이 요구된다(Conlon et al., 2011).

한파로 인한 건강 피해의 규모와 심각성은 지역의 사회·경제적 조건에 따라 크게 달라진다. 선행연구들에서는 노년층, 저소득층, 에너지 빈곤 가구가 한파에 상대적으로 취약함이 반복적으로 지적되어 왔으며, 단열 성능이 낮은 노후 주택 거주자나 난방비 부담이 큰 가구는 실내 환경에서도 저온 노출에 취약할 가능성이 높다(Liddell and Morris, 2010; Park et al., 2018). 이러한 취약성은 개인 수준을 넘어 지역 단위로 집적되는 경향을 보이며, 그 결과 한파로 인한 건강 피해가 특정 지역에 불균형적으로 집중될 수 있다(Almendra et al., 2017).

이와 같은 사회적 취약성은 기후변화의 장기 추세 속에서 더욱 중요한 문제로 부각되고 있다. 일부 연구에서는 인구 고령화가 동반될 경우, 한파로 인한 건강 피해 수준이 증가할 수 있음을 보여준다(De Schrijver et al., 2023). 동아시아 도시를 대상으로 한 연구에 따르면, 폭염 관련 사망률은 장기적으로 감소한 반면, 한파 관련 사망률에서는 상대적으로 제한적인 변화만이 관찰되었으며, 이러한 차이는 인구 구조와 사회·경제적 요인과 연관되는 것으로 분석된다(Chung et al., 2017). 이는 평균기온 상승이라는 완화 요인이 존재하더라도, 지역의 구조적 취약성이 한파 리스크를 지속적으로 증폭시킬 수 있음을 시사한다.

한국은 고령화가 빠르게 진행되면서, 2025년을 전후로 65세 이상 인구 비중이 20%를 넘어 초고령사회에 진입할 것으로 전망된다(Statistics Korea, 2023). 이러한 인구 구조 변화를 고려할 때, 한파로 인한 건강 리스크를 관리하는 데 있어 정책적 대응은 매우 중요하다. 정부와 지자체는 한파에 대비하여 한파쉼터 운영, 취약계층 보호 프로그램, 정보 제공 강화 등 다양한 적응대책을 추진해 오고 있다.¹⁾ 따라서 한파 대응 정책이 실제로 건강 피해를 얼마나 완화하는지를 실증적으로 검증할 필요가 있다.

그러나 국내에는 이러한 적응대책의 효과를 정량적으로 평가한 실증 분석이 충분히 축적되지 않았으며, 또한 현재까지 수행된 효과 검증 연구는 상대적으로 폭염에 편중되어 왔다는 한계가 있다(Chae and Kim, 2020). 특히

재난문자 발송, 쉼터 운영, 취약계층 보호 프로그램과 같은 구체적 정책 수단이 한파로 인한 건강 피해를 얼마나, 어떠한 경로로 완화하는지에 대한 분석은 제한적이다. 다수의 선행연구가 한파 위험의 존재나 정책 필요성 제시에 초점을 두었다면, 정책 개입의 규모·투입, 강도·지역 특성에 따른 효과 차이를 실증적으로 검증한 연구는 상대적으로 드물다.

본 연구에서는 이러한 연구 공백을 해소하기 위해, 한국에서 시행 중인 한파 적응대책이 한랭질환 환자 발생에 미치는 영향을 실증적으로 분석하고자 한다. 분석 기간은 2014~2023년 동절기(11월~3월)이며, 전국 229개 시군구를 대상으로 한다. 종속변수는 한랭질환 환자 수이고, 주요 설명변수로는 인구 100명당 한파쉼터 수용 가능 인원수와 한파 재난문자 발송 횟수로 설정하였다. 정책 효과의 발생 단계별 차이와 지역 간 이질성을 식별하기 위해 Two-part 모형과 음이항 모형(Negative Binomial Regression)을 적용하였다.

구체적인 연구 목적은 다음과 같다. 첫째, 한파쉼터 수용능력과 재난문자 발송이 한랭질환의 발생 여부와 발생 규모를 각각 유의하게 감소시키는지 검증한다. 둘째, 재난문자 발송의 투입량 증가에 따른 한계효과와 변화와 비선형성을 분석하여 정책 개입의 효율성을 평가한다. 셋째, 적응대책의 효과가 지역의 사회·환경적 특성에 따라 어떻게 달라지는지를 분석한다. 본 연구는 지자체 단위의 구체적 한파 적응대책을 건강 자료에 기반해 정량적으로 평가함으로써, 향후 기후 적응 정책 설계와 자원 배분을 위한 실증적 근거를 제공한다는 점에서 의의를 갖는다.

2. 선행연구

기후 적응대책의 리스크 저감 효과를 분석한 선행연구들은 주로 간접적인 효과를 규명하거나 물리적 대책의 접근성 및 입지 특성을 평가하는 데 집중해 왔으며, 한파 적응대책의 건강 효과를 직접적으로 분석한 연구는 매우 제한적이다. 일부 연구는 적응대책이 건강에 미칠 수 있는 효과를 거시적 관점에서 평가하고자 하였다. Chalabi et al. (2016)은 영국의 한파 대응 계획(Cold Weather Plan;

1) 정부는 제4차 국가 기후위기 적응대책(2026~2030)을 수립·시행하여 응급감시체계 및 조기경보시스템 강화, 사회·경제적 취약계층 지원 확대 등 다양한 적응대책을 추진하고 있다. 또한 질병관리청은 기후보건 중장기계획(2024~2028)을 통해 한파 경보 기능 고도화, 기상자료 연계 위험요인 분석, 취약계층 맞춤형 건강관리 전략 및 지역 협력체계 구축 등을 추진하고 있다(Ahn et al., 2024). 지자체 차원에서는 이러한 정책 기조에 따라 한파쉼터를 지정·운영하고 있으며, 전국적으로 한파 재난문자 발송 등 조기 경보 중심의 적응대책이 시행되고 있다.

CWP) 도입 이후의 효과를 시뮬레이션 모델을 통해 분석하여, 해당 정책이 예산 대비 효과적일 가능성이 있음을 제시하였다. 그러나 이 연구는 실제 정책 집행과 건강 결과 간의 직접적인 연계를 실증적으로 검증하지는 못하였다. 한편 Chirakijja et al. (2024)은 패널 데이터 분석을 통해 미국의 천연가스 가격 하락이 겨울철 난방비 부담을 완화하고, 그 결과 겨울철 사망률을 유의미하게 감소시켰음을 보여주었다. 이 연구는 에너지 비용 완화와 같은 적응대책이 건강 리스크를 저감할 수 있음을 시사하지만, 구체적인 정책 수단의 효과를 직접적으로 식별하지는 않았다.

국내 연구의 경우, 대표적인 적응대책인 재난문자와 쉼터를 대상으로 한 분석이 이루어져 왔으나, 대부분 건강 결과보다는 행동 변화나 사회적 비용 절감과 같은 간접적 효과에 초점을 두었다. Hong et al. (2023)은 유동인구 변화 분석을 통해 폭염 재난문자가 시민들의 야외 이동을 자제시키는 효과가 있음을 확인하였다. Song and Jo (2022)는 태풍·대설·폭염 등 자연재해를 대상으로 긴급재난문자의 효과를 분석하여, 재난문자 1회 추가 발송할 경우 피해복구비가 약 1억 원 감소하는 것으로 추정하였다. 그러나 이러한 연구들은 재난문자 발송이 실제 건강 피해를 얼마나 감소시키는지 직접적으로 분석하지는 못하였다.

취약계층 보호를 위한 핵심 수단인 쉼터에 관한 연구 역시 그 효과성보다는 시설의 입지와 접근성 평가에 집중되어 왔다. Ahn and Chae (2018)는 서울시 무더위 쉼터의 접근성을 네트워크 분석을 통해 평가하며 공간적 형평성 문제를 제기하였다. Kang et al. (2024)은 LISA 분석을 활용하여 지역별 폭염 취약성과 인구 분포를 고려한 무더위 쉼터 입지 특성을 분석하였다. 이들 연구는 정책 설계에 유용한 공간적 시사점을 제공하지만, 쉼터 운영이 건강 피해를 직접적으로 완화하는지에 대한 실증적 근거를 제시하지는 않는다.

그럼에도 불구하고 일부 국외 연구들은 적응대책이 사망률이나 병원 이용과 같은 직접적인 건강 지표에 미치는 영향을 정량적으로 입증하였다. Iparraguirre (2015)는 ARIMA 모형을 활용하여 영국의 겨울철 연료비 지원 정책이 노년층의 에너지 빈곤을 완화하고, 그 결과 겨울철 초과 사망률을 감소시켰음을 보여주었다. Chau et al. (2009)은 홍콩의 폭염 경보 시스템(Very Hot Weather Warning; VHWW)이 허혈성 심장질환과 뇌졸중으로 인한 사망 위험을 유의미하게 낮추었음을 분석하였다. 또한 Howden-Chapman et al. (2007)은 주택 단열 시공을 통한 물리적 환경 개선 정책이 호흡기 질환 유병률과 병원 방문 빈도를 실질적으로 감소시킨다는 사실을 입증하였다. 이러한 연구들은 동일한 기

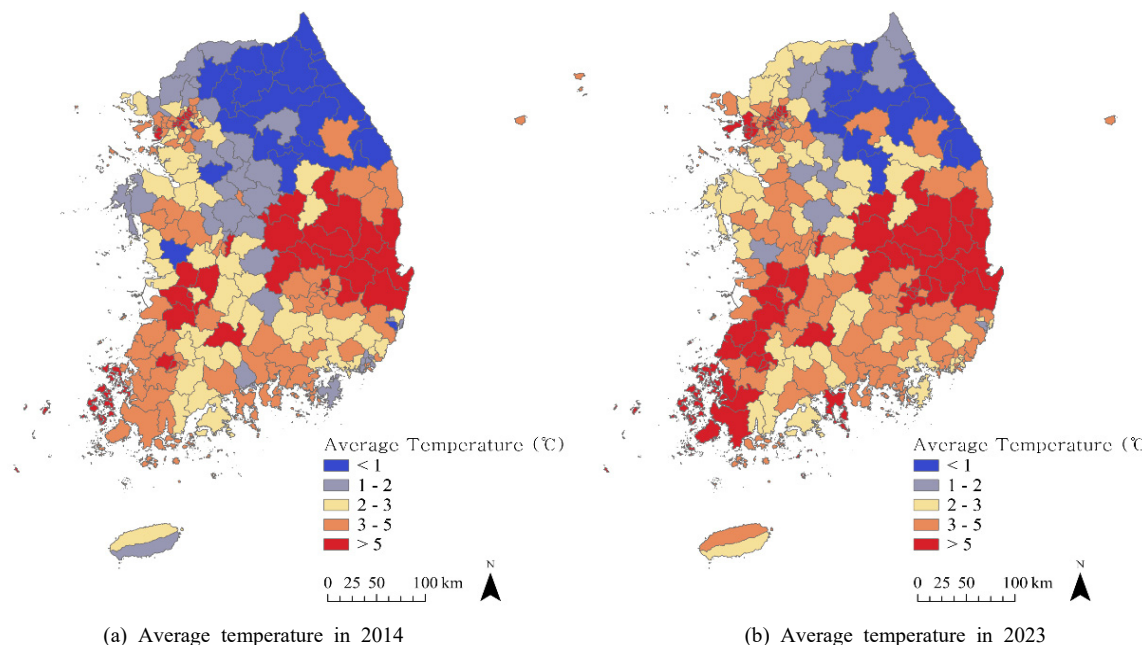


Fig. 1. Spatial distribution of average winter temperature (November to March) in South Korea: Comparison between 2014 and 2023

후 조건 하에서도 적응대책의 시행 여부와 수준이 건강 리스크의 크기를 좌우할 수 있음을 보여준다.

요약하면, 기존 선행연구는 기후 적응대책의 필요성을 제시하고 정책의 잠재적 효과나 간접적 리스크 저감 가능성을 확인하는 데 기여해 왔으나, 한국의 지자체가 실제로 시행 중인 한파 적응대책이 건강 피해를 통계적으로 유의하게 감소시키는지에 대한 실증 분석은 여전히 부족하다. 특히 한파 쉼터의 수용 능력이나 재난문자 발송과 같은 구체적 정책 수단이 한랭질환의 발생 여부와 발생 규모에 어떠한 영향을 미치는지, 그리고 그 효과가 지역 특성에 따라 어떻게 달라지는지에 대한 분석은 제한적이다. 이에 본 연구는 시군구 단위 자료를 활용하여 한파 쉼터 수용 능력과 재난문자 발송 빈도가 한랭질환 환자 발생에 미치는 영향을 정량적으로 분석함으로써, 기존 연구의 공백을 보완하고자 한다.

3. 분석자료 및 방법

3.1. 분석범위

본 연구에서는 대한민국 전국 229개 시군구를 대상으로, 2014년부터 2023년까지의 10개년을 분석 기간으로 설정하였다. 분석 대상 기간은 한파의 영향이 집중되는 동절기(11월~3월)로 한정하였다.²⁾

Fig. 1은 2014년과 2023년의 동절기 평균기온 공간 분포이다. 최근 동절기 평균기온은 전반적으로 상승하는 추세를 보이지만, 지역별 기온 수준과 변화 양상에는 여전히 뚜렷한 공간적 이질성이 관찰된다. 북부 내륙 및 산간 지역에서는 상대적으로 낮은 평균기온이 유지되는 반면, 남부 및 연안 지역에서는 고온 구간에 해당하는 지역의 비중이 확대되는 경향이 나타난다.

한편, 평균기온의 장기적 상승 추세와는 달리, 최근 수십 년간 이상저온 현상의 강도는 지역에 따라 여전히 크게 나타나고 있다. 예를 들어, 2021년 12월 서울의 최저기온은 -15.5°C 로 1980년 이후 12월 기준 최저치를 기록하였으며(KMA, 2021), 2025년 2월 역시 최근 10년 중 가장

낮은 평균기온을 보이며 이례적인 한파로 평가되었다(KMA, 2025). 이러한 사례는 평균적인 온난화 추세 속에서도 지역별 한파 노출 수준이 상이하게 나타날 수 있음을 보여준다.

이러한 공간적 기온 분포의 차이는 동일한 한파 조건하에서도 지역별 건강 위험의 크기와 분포가 달라질 가능성을 시사한다. 본 연구는 이러한 지역 간 이질성을 고려하여, 시군구 단위에서 한파 적응대책의 효과를 정량적으로 분석하는 데 초점을 둔다.³⁾

Fig. 2, Fig. 3은 2014~2023년 기간 동안 한랭질환 환자 수와 적응대책의 월평균 공간 분포이다. 재난문자 발송 횟수는 지역별로 비교적 뚜렷한 편중 양상을 보이며, 평균 기온이 낮은 강원도와 경기도 북부 지역에서 상대적으로 높은 수준이 관찰된다. 반면, 한파쉼터 수용 가능 인원과 한랭질환 환자 수는 인접 지역 간에도 상당한 차

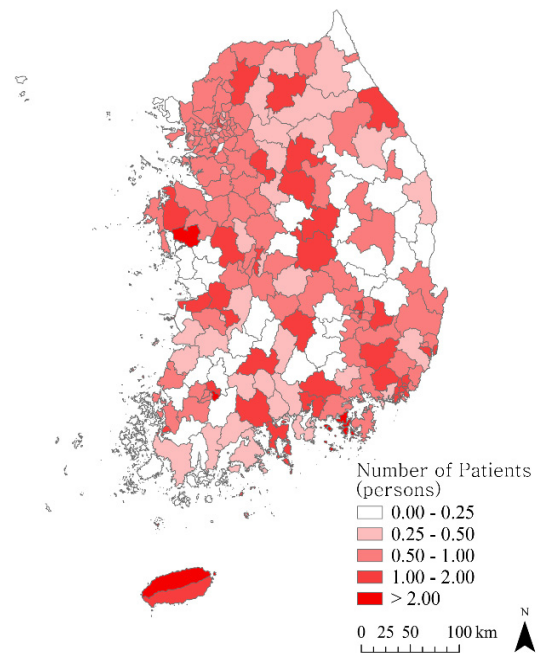


Fig. 2. Spatial distribution of cold-related illness patients per 10,000 population by region

- 2) 시군구-월 단위에서 한 명 이상 환자가 발생한 관측치는 전체의 약 63.4%를 차지한다. 월별로는 1월(약 80.8%)과 2월(약 71.4%)에서 높은 발생 비율이 나타나고, 3월(약 54.2%)과 11월(약 36.8%)에서는 상대적으로 낮은 수준을 보인다. 또한 발생은 특정 지역에 국한되지 않고 다양한 시군구에서 전반적으로 관찰된다.
- 3) Moran's I 검정을 통해 공간적 자기상관 여부를 점검한 결과, 한랭질환 발생 규모 기준으로 유의한 양(+)의 공간적 자기상관이 확인되었다(Moran's $I=0.120$, $p<0.001$). 다만 본 연구는 공간적 파급효과의 구조적 추정보다는 평균적 관계를 분석하는 데 목적이 있으므로 공간계량모형은 적용하지 않았다. 대신 지역 특성 변수들을 통제하고, 시군구 단위로 표준오차를 클러스터링하여 상관계수를 부분적으로 반영하였다.

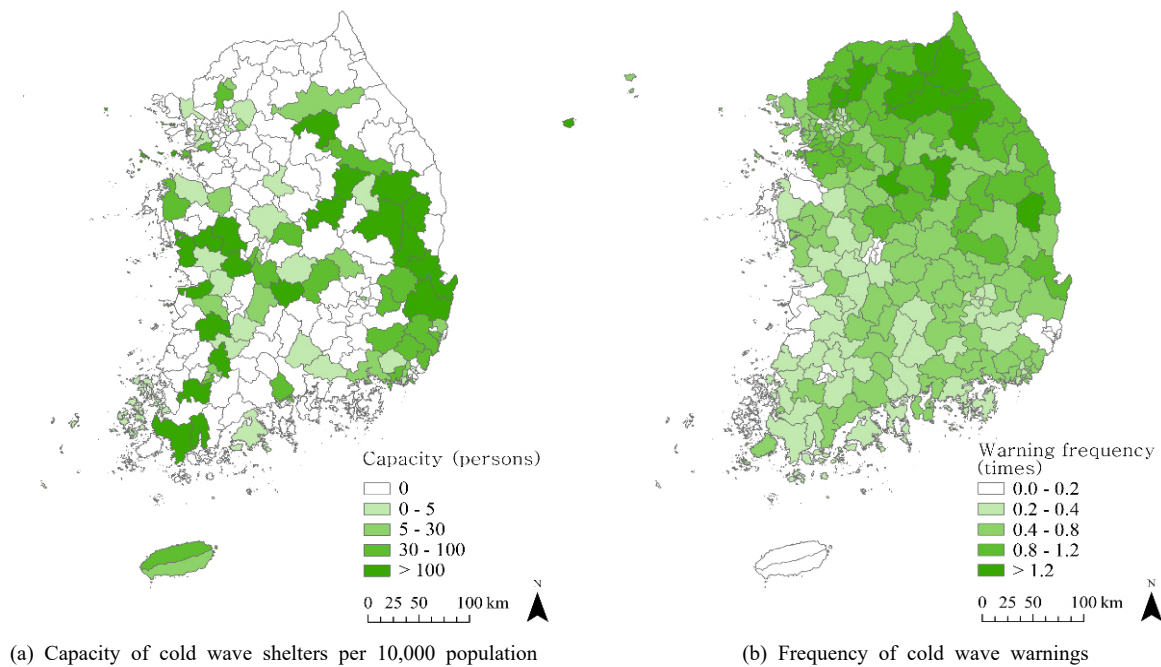


Fig. 3. Implementation levels of cold wave adaptation policies by region

이를 보이는 등 보다 불균등한 공간 분포를 나타낸다. 이러한 분포 특성은 한파 노출 여건과 적응대책 시행 수준이 지역별로 상이함을 보여준다.

3.2. 분석자료 및 변수

본 연구에서는 시군구 단위의 월별 패널 자료를 구축하여 한파 적응대책과 한랭질환 발생 간의 관계를 분석하였다. 분석에 사용된 변수의 정의는 Table 1에 제시하였으며, 기초통계량은 부록에 제시하였다.

종속변수는 시군구별 한랭질환 환자 수이다. 해당 변수는 건강보험심사평가원에서 제공한 시군구 단위 월별 환자수의 합이며, 한파로 인한 한랭질환에 해당하는 상병코드(T33-T35, T68, T69)가 주상병으로 청구된 명세서를 기준으로 산정하였다.⁴⁾

핵심 설명변수는 지자체 차원의 한파 적응대책을 반영

하는 지표로서, 인구 100명당 한파쉼터 수용 가능 인원수(Shelter)와 한파 재난문자 발송 횟수(Warning)로 구성된다. 한파쉼터 수용 가능 인원수는 행정안전부 재난안전데이터 공유 플랫폼 자료를 활용하였다. 해당 자료는 쉼터별 소재지, 면적, 이용 가능 인원 정보를 포함하고 있으며, 이 중 이용 가능 인원은 정책이 실제로 포괄할 수 있는 보호 범위를 가장 직접적으로 반영하는 지표로 판단되어 사용하였다. 다만, 월별 운영 정보가 제공되지 않고 수용 규모의 단기 변동이 제한적이라는 점을 고려하여 연도 단위로 집계하였다.⁵⁾

한파 재난문자 발송 횟수는 행정안전부가 운영하는 재난문자방송시스템(CBS: Cell Broadcasting Service)을 통해 송출된 긴급재난문자 중 ‘한파’로 분류된 발송 내역을 활용하여 구축하였다. 재난문자방송은 「재난 및 안전관리 기본법」에 근거하여 중앙 및 지방자치단체가 발송 권한을

4) 환자 수가 월별로 3명 이하인 경우 개인정보 보호를 위해 해당 관측치는 마스킹 처리되어 제공되며, 본 연구에서는 이를 결측값으로 간주하여 분석에서 제외하였다. 또한 건강보험심사평가원 자료는 개인 단위의 인구사회학적 특성(예: 연령, 성별, 소득수준 등)을 포함하지 않기 때문에 환자별 이질성을 직접적으로 반영하는 데에는 한계가 있다. 다만 본 연구에서는 시군구 및 연도 고정효과와 지역 수준의 사회·경제적 변수(예: 지역총생산액, 독거노인가구 비율, 의료 인프라 등)를 포함하여, 관측 가능한 지역 간 구조적 차이를 부분적으로 통제하고자 하였다. 이러한 한계는 결과 해석 시 고려될 필요가 있으며, 향후 보다 미시적인 자료를 활용한 분석이 보완적으로 이루어질 필요가 있다.

5) 한파쉼터 수용능력은 연도 단위로 집계되며, 일부 지역에서는 정책 확충에 따라 연도 간 변동이 확인된다. 본 연구의 모형에서는 해당 변수의 효과가 지역 간 수준 차이와 연도 간 변화에 의해 함께 식별된다. 다만 시간적 변동이 제한적이라는 점에서 식별력이 제약될 수 있으므로, 쉼터 변수의 추정 결과는 정책 변화가 관측된 지역을 중심으로 해석할 필요가 있다.

가지며, 재난 발생 또는 발생 우려 시 피해 예방을 목적으로 공식적으로 송출되는 정보이다. 본 연구에서는 해당 시스템에 기록된 발송 이력을 기반으로 지자체별·월별 발송 횟수를 집계하였으며, 발송 지역이 명확히 특정되지 않는 사례는 측정 오차를 최소화하기 위해 분석에서 제외하였다.

통제변수로는 기후 요인과 사회·경제적 요인을 포함하였다. 기후 요인은 강도를 반영할 수 있는 한파일수(cdays)와 평균 풍속(wspd)으로 구성하였다. 한파일수는 기상청 방재기상관측(AWS) 일별 자료를 바탕으로 산정한 뒤 월단위로 집계하여 구축하였다. 평균 풍속은 저온 환경에서 체감 온도를 변화시키는 요인으로 알려져 있어 함께 고려

하였으며(Li et al., 2025), 같은 자료원의 월별 자료를 활용하였다. 기후 변수는 모두 공간 보간하여 시군구 단위로 구축하였다(Lee et al., 2022).⁶⁾

사회·경제적 통제변수로는 1인당 지역총생산(grdp), 1인당 병상 수(beds), 1인당 공원 면적(park), 독거노인가구 비율(alone_share)을 포함하였다. 이들 변수는 월별 자료가 구축되어 있지 않거나 단기 변동성이 제한적이라는 점을 고려하여 연도별 자료를 사용하였다. 또한 재정자립도(fin)와 도시면적비율(urban_area)은 각각 지역의 경제 수준과 도시 인프라를 대체적으로 반영하는 변수로서, 1인당 지역총생산(grdp)과 1인당 공원 면적(park)을 대체하는 사양(alternative specification)으로 추가 분석에 포함하였다.

Table 1. Definition of variables

Category	Variable	Description	Unit	Source
Dependent	patient	Number of cold-related illnesses	persons	Health Insurance Review and Assessment Service (HIRA)
Independent				
Policies	Shelter	Heating shelter capacity per 100 people	persons	Ministry of the Interior and Safety (MOIS)
	Warning	Frequency of cold wave warnings	count	
Climate	cdays	Number of Cold wave days	days	Korea Meteorological Administration (KMA)
	tmin	Minimum Temperature	°C	
	wspd	Monthly average wind speed	m/s	
Socioeconomic	grdp	Gross Regional Domestic Product per capita	million KRW	Statistics Korea
	fin	Financial independence rate	%	
	beds	Number of hospital beds per capita	beds per person	
	park	Park area per capita	m ²	
	alone_share	Share of single elderly households	%	
Regional characteristics	elder_share	Share of elderly population (aged 65 and above)	%	Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT)
	urban_area	Urban land share	%	
	urban	Urban classification (1=urban [Si/Gu], 0=rural [Gun])	(0,1)	Ministry of the Interior and Safety (MOIS)

Note: urban land share (urban_area) is additionally included as alternative specifications in the robustness checks.

6) 기후 변수의 공간 보간에는 역거리가중기법(IDW; power=0.5-4)과 정규 크리깅(Ordinary Kriging; spherical, exponential, gaussian, linear, circular 모델)을 적용하였다. 각 보간 기법 및 모형에 대해 5-fold 교차검증을 수행하였으며, 평균 제곱근 오차(RMSE)를 기준으로 예측 성능이 가장 우수한 기법을 최종 보간 방법으로 선택하였다.

한편, 정책 효과의 이질성을 분석하기 위해 노인 인구 비중(elder_share)과 도시화 유형(urban) 변수를 포함하였다. 노인 인구 비중은 65세 이상 인구 비율로 정의하였으며, 도시화 유형은 행정구역 기준에 따라 시·구를 도시지역, 군을 비도시 지역으로 구분한 더미변수로 구성하였다 (Kim et al., 2017).

3.3. 분석 방법

본 연구는 한파 적응대책이 한랭질환 환자 수에 미치는 영향을 실증적으로 분석하기 위해, 종속변수의 자료적 특성을 고려한 계량모형을 적용하였다. 한랭질환 환자 수는 0 이상의 정수 값을 갖는 가산자료이며, 환자가 발생하지 않은 관측치가 다수 존재하는 동시에 분산이 평균을 초과하는 과산포(overdispersion) 특성을 보인다. 이러한 자료적 특성을 반영하기 위해, 본 연구는 환자 발생 여부와 발생 규모를 분리하여 추정하는 Two-part 모형을 적용하였다 (Lym and Lym, 2025; Oh and Moon, 2023).

또한 영과잉(zero inflation) 가능성을 고려한 대안 모형으로서 ZINB 모형을 추가적으로 검토하였으며, 관련 결과는 부록(Table A1)에 제시하였다. 다만 본 연구는 정책 효과를 발생 여부와 발생 규모로 구분하여 해석하는 데 초점을 두고 있어, Two-part 모형을 기본 분석틀로 채택하였다.⁷⁾

구체적으로 Step 1에서는 로짓(Logit) 모형을 통해 한랭질환 환자 발생 확률을 추정하였다(식 (1)). 이를 통해 한파 적응대책이 환자의 ‘발생 여부’ 단계에서 어떠한 역할을 하는지를 분석하였다. 이때 재난문자 발송 효과가 한파 노출 수준에 따라 달라질 가능성을 고려하여, 재난문자와 한파 강도 변수 간 상호작용항을 포함한 확장 모형을 함께 추정하였다. Step 2에서는 한랭질환 환자가 실제로 발생한 관측치($Y_{i,t}^{patient} > 0$)에 한해 음이항 회귀모형(Negative binomial regression)을 적용하여 환자 발생 규모를 분석하였다(식 (2)). 이러한 Two-part 접근은 적응대책이 환자 발생을 사전에 억제하는 효과와, 발생 이후 환자 수를 완화하는 효과를 구분하여 해석할 수 있다는 장점을 갖는다.

Part 1: 한랭질환 환자 발생 확률 분석

$$\log \text{it}(\Pr(Y_{i,t}^{patient} > 0)) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &= \beta_1 Shelter_{i,t} + \beta_2 Warning_{i,t} + \beta_3 Warning_{i,t}^2 \\ &+ \beta_4 Cdays_{i,t} + \beta_5 (Warning_{i,t} \times Cdays_{i,t}) \\ &+ \gamma_1 Wspd_{i,t} + \delta_1 Z_{i,t} + \tau_{1,t} \end{aligned}$$

Part 2: 한랭질환 환자 발생 규모 분석

$$\ln(E[Y_{i,t}^{patient} | Y_{i,t}^{patient} > 0]) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &= \ln(Rp_{i,t}) + \beta_6 Shelter_{i,t} + \beta_7 Warning_{i,t} \\ &+ \beta_8 Warning_{i,t}^2 + \beta_9 Cdays_{i,t} + \beta_{10} (Warning_{i,t} \times Cdays_{i,t}) \\ &+ \gamma_2 Wspd_{i,t} + \delta_2 Z_{i,t} + \tau_{2,t} + \epsilon_{i,t} \end{aligned}$$

여기서, $Y_{i,t}^{patient}$ 는 시군구 i , 시점 t 의 한랭질환 환자 수를 나타낸다. $Shelter_{i,t}$ 는 인구 100명당 한파쉼터 수용 가능 인원 수, $Warning_{i,t}$ 는 한파재난문자 발송 횟수를 의미한다. $Cdays_{i,t}$ 는 한파일수이며, $Wspd_{i,t}$ 는 평균 풍속, $Z_{i,t}$ 는 사회·경제(인구 1인당 GRDP, 1인당 공원면적, 독거노인가구 비율) 및 의료 인프라 통제변수(1인당 병상 수) 벡터를 의미한다. τ_t 는 월 고정효과, $\epsilon_{i,t}$ 는 오차항이다. 환자 발생 규모는 지역별 인구 규모에 크게 좌우될 수 있으므로, Step 2에서는 시군구별 인구수($Rp_{i,t}$)를 함께 고려하여 적응대책의 효과를 인구 규모와 분리해 추정하였다.

한편, 재난문자 발송 횟수와 한파쉼터 수용능력 변수는 한파 위험에 대한 행정적 대응으로 결정될 수 있어, 역인과성 및 동시성에 따른 내생성 가능성이 존재한다. 이를 완화하기 위한 강건성 검토로서, 부록에서는 정책 변수의 1기 시차값을 활용한 대안 모형을 추가적으로 추정하였으며, 주요 결과의 방향성은 전반적으로 유지됨을 확인하였다(Table A5 참조).

그럼에도 불구하고 본 연구에서는 동시적(contemporaneous) 정책 변수를 기본 모형으로 채택하였다. 이는 한파쉼터의 경우 해당 시점의 실제 수용 가능 인원이 환자 발생에 직접적으로 영향을 미치는 현재의 보호 수준을 반영하는 변수이며, 과거 시점의 수용능력보다는 현재의 인프라 수준

7) ZINB 모형은 영과잉 구조를 명시적으로 반영함으로써 통계적 적합도가 개선될 수 있으나, 본 연구의 핵심 목적은 한파 적응대책이 환자 발생 여부(occurrence)와 발생 이후 규모(severity)에 각각 어떻게 작용하는지를 구분하여 분석하는 데 있다. Two-part 모형은 이러한 목적에 부합하도록 두 단계를 명시적으로 분리하여 추정할 수 있다는 장점을 갖는다. 반면 ZINB 모형은 구조적 영과 표본 영을 구분하여, zero-generating process와 count process를 동시에 고려하는 구조를 갖는다(Kim et al., 2021). 그러나, 각 과정에서 정책 효과를 사전 예방 효과와 사후 완화 효과로 구분하여 해석하는 데에는 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 ZINB 모형의 적합도 개선 가능성을 확인하였음에도 불구하고, 해석 가능성과 연구 목적과의 정합성을 고려하여 Two-part 모형을 기본 분석틀로 채택하였다.

이 보다 정책적으로 의미 있기 때문이다. 또한 재난문자 역시 한파 발생 시점에 즉각적인 행동 변화를 유도하기 위한 정보 전달 수단으로, 시간 지연을 두고 효과가 나타나는 구조보다는 동시적 반응에 기반한 정책 수단으로 해석하는 것이 적절하다. 이러한 점에서 본 연구는 정책 효과의 동시적 연관성에 초점을 두고 분석을 수행하였다.

다음으로, 한파 적응대책의 환자 수 감소 효과가 지역의 사회적 특성에 따라 이질적으로 나타나는지를 검토하기 위해 이질성 분석을 수행하였다. 이를 위해 환자 발생 규모 모형(Step 2)을 확장하여, 고령 인구 비율과 도시화 유형 변수를 각각 포함하고 정책 변수와의 상호작용항을 추가하였다(식 (3), 식 (4)). 이러한 설정을 통해 고령 인구 비중 및 도시화 수준에 따라 적응대책의 한계효과가 달라지는지를 분석하였다.

고령화 심화 여부에 따른 이질성 분석

$$\begin{aligned} \ln(E[Y_{i,t}^{patient} | Y_{i,t}^{patient} > 0]) \\ = \ln(Pop_{i,t}) + \beta_{11} Shelter_{i,t} + \beta_{12} Warning_{i,t} \\ + \beta_{13} Warning_{i,t}^2 + \beta_{14} Tmin_{i,t} + \beta_{15} Elder_Share_{i,t} \\ + \beta_{16}(Shelter_{i,t} \times Elder_Share_{i,t}) \\ + \beta_{17}(Warning_{i,t} \times Elder_Share_{i,t}) \\ + \gamma_3 Wspd_{i,t} + \delta_3 \ln Z_{i,t} + \tau_{3,t} + \epsilon_{i,t} \end{aligned} \quad (3)$$

도시화 유형에 따른 이질성 분석

$$\begin{aligned} \ln(E[Y_{i,t}^{patient} | Y_{i,t}^{patient} > 0]) \\ = \ln(Pop_{i,t}) + \beta_{13} Shelter_{i,t} \\ + \beta_{14} Shelter_{i,t}^2 + \beta_{15} Warning_{i,t} \\ + \beta_{16} Warning_{i,t}^2 + \beta_{17} Tmin_{i,t} \\ + \beta_{18} Urban_{i,t} + \beta_{19}(Shelter_{i,t} \times Urban_{i,t}) \\ + \beta_{20}(Warning \times Urban_{i,t}) \\ + \gamma_4 Wspd_{i,t} + \delta_4 \ln Z_{i,t} + \tau_{4,t} + \epsilon_{i,t} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $Shelter_{i,t}$ 는 인구 100명당 한파쉼터 수용 가능 인원 수, $Warning_{i,t}$ 은 한파재난문자 발송 횟수를 의미한다. $Tmin_{i,t}$ 는 최저기온, $Wspd_{i,t}$ 는 평균 풍속, $Z_{i,t}$ 는 사회·경제(인구 1인당 GRDP, 1인당 공원면적, 독거노인가구 비율) 및 의료 인프라 통제변수(1인당 병상 수) 벡터를 의미한다. τ_t 는 월 고정효과, $\epsilon_{i,t}$ 는 오차항이다. 또한, $Elder_Share_{i,t}$ 는

시군구 i 의 고령인구 비율을 나타내며, $Urban_{i,t}$ 는 도시/비도시 구분을 나타내는 더미 변수이다. 고령화 이질성 모형에서는 고령 인구 비율($elder_share$)과 높은 상관 가능성을 고려하여 독거노인가구 비율 변수($alone_share$)는 제외하였으며, 도시화 이질성 모형에서는 도시화 수준과 밀접하게 연관된 공원 면적 변수($park$)는 제외하였다.

본 연구에서는 분석 목적에 따라 한파 노출 지표를 구분하여 사용하였다. 메인 모형에서는 정책이 실제로 대응하는 한파 상황을 반영하기 위해 한파일수($cdays$)를 활용하였다. 한파일수는 특정 임계값을 기준으로 정의된 극한 기온 발생 여부 및 빈도를 나타내는 변수로, 재난문자 발송이나 한파쉼터 운영과 같은 정책 대응과 직접적으로 연관된 지표라는 점에서 적합하다.

반면 이질성 분석에서는 고령화 수준 및 도시화 유형과의 상호작용을 통해 정책 효과의 상태의존적 변화를 식별하는 데 초점을 두고 있다. 이러한 목적에서는 한파 노출을 단순한 발생 여부가 아니라 강도의 연속적 차원에서 파악할 필요가 있으므로, 최저기온($tmin$)을 활용하여 저온 강도의 미세한 차이를 반영하고 정책 효과의 변화 양상을 보다 정밀하게 추정하고자 하였다. 기존 연구에서도 온도와 건강 간 관계를 분석할 때 극한 발생 여부뿐 아니라 전체 온도 분포를 고려하는 접근의 중요성이 강조되어 왔다(Gasparrini et al., 2015).

모든 모형에는 월 고정효과를 포함하여 한랭질환의 계절성 및 시간에 따른 공통 충격을 통제하였다. 또한 지역 단위로 클러스터링($clustering$)한 강건 표준오차($robust\ standard\ error$)를 사용하여 이분산성($heteroskedasticity$)과 자기상관($autocorrelation$) 가능성에 대비하였다.

한편, 한파쉼터 수용 가능 인원은 분포가 우측으로 치우쳐 있을 수 있으며, 정책 확충 효과 또한 선형적이지 않을 가능성이 있다. 이에 본 연구에서는 쉼터 변수의 수준향과 제곱항을 활용하여 비선형 가능성을 점검하였다. 특히 도시화 이질성 모형에서는 쉼터가 물리적 수용능력을 기반으로 하는 인프라 성격을 가지며, 인구 밀집도가 높은 지역일수록 일정 수준 이상의 공급 이후 추가 확충에 따른 한계효과가 체감될 가능성이 존재한다는 점을 고려하여 제곱항을 포함하였다.

한파재난문자의 경우, 낮은 발송 빈도에서는 위험 인식이 충분히 형성되지 않을 수 있는 반면, 일정 수준 이상 누적될 경우 예방 행동을 유도할 가능성이 존재한다. 반대로 과도한 발송은 정보 피로($information\ fatigue$)를 유발하여 정책 효과를 약화시킬 가능성도 제기된다(Lee et

al., 2021). 이러한 잠재적 비선형성을 반영하기 위해 재난 문자 발송 횟수의 이차항을 포함하였다.⁸⁾

4. 분석 결과

4.1. 한파 적응대책의 한랭질환 발생 효과

한파 적응대책이 한랭질환 환자 발생에 미치는 영향을 분석하기 위해 Two-part 모형을 적용하여, 환자 발생 확률(Step 1)과 발생 시 환자 수(Step 2)를 구분해 추정하였다. 본 연구의 결과는 관측된 변수들을 조건으로 한 조건부 상관관계(association)로 해석되어야 하며, 내생성 가능성 등을 고려할 때 인과적 해석에는 구조적인 한계가 존재한다.

예컨대, 재난문자 발송이나 한파쉼터 수용능력이 높은 지역은 다른 한파 대응 정책이나 전반적인 대응 역량 또한 높은 지역일 가능성이 있으며, 이 경우 개별 정책 변수의 추정치에는 지역의 종합적 대응 수준이 일부 반영될 수 있다. 따라서 본 연구의 결과는 개별 정책의 순수한 효과로 해석하기보다는, 지역 한파 대응체계 내에서 해당 정책이 갖는 조건부 연관성을 반영한 결과로 이해할 필요가 있다.

4.1.1. 한랭질환 발생 확률에 대한 효과

먼저 한랭질환 환자 발생 여부를 추정한 Step 1에서는, 재난문자와 한파일수 간 상호작용항을 포함하지 않은 기본 모형(Model A)과 상호작용항을 포함한 확장 모형(Model B)을 설정하여 각각 추정하였다. 이는 재난문자 발송과 같은 정책 효과가 한파일수로 대표되는 극한 저온 노출 강도에 따라 달라지는지, 즉 정책 효과의 상태의존적(state-dependent) 특성을 확인하기 위함이다.

Model A 결과에서는 한파쉼터 수용능력과 재난문자 발송이 모두 환자 발생 확률과 통계적으로 유의한 음(-)의 효과를 보였다. 평균 한계효과 기준으로는 쉼터 수용능력은 약 -0.015, 재난문자 발송은 약 -0.017 수준의 감소 효과가 나타나, 두 정책 모두 한랭질환 발생 가능성을 낮추는 방향의 연관성이 확인되었다. 다만 이러한 결과는 쉼터 이용을 통한 노출 감소, 사전적 예방 행동, 또는 지역

의 대응 역량 등 다양한 요인이 복합적으로 반영된 결과일 수 있으며, 본 연구에서는 이를 개별적으로 구분하기에는 한계가 있다. 또한 재난문자 제공항(Warning²)이 유의하게 나타나, 발송 횟수 증가에 따른 효과가 비선형적으로 변화할 가능성이 확인되었다. 이는 재난문자가 반복될수록 효과가 점차 감소할 수 있음을 보고한 기존 선행연구의 결과와도 일관된 경향으로 해석될 수 있다(Yoon and Nam, 2022).

반면, 상호작용항을 포함한 Model B에서는 재난문자 발송과 한파일수 간 상호작용항(Warning×cdays)이 유의한 양(+)의 효과를 보였으며, 이는 한파일수가 증가할수록 재난문자 발송의 환자 감소 효과가 점차 약화되는 경향을 시사한다. 쉼터 수용능력과 재난문자 발송의 평균 한계효과는 각각 약 -0.015와 -0.018 수준으로, 정책 변수의 기본적인 감소 효과는 상호작용항 포함 여부와 관계없이 전반적으로 유지되는 것으로 나타났다.

기후 변수로 도입한 한파일수(cdays)는 극한 저온 노출 강도를 반영하는 지표로, Model A와 Model B 모두에서 단일 계수 기준으로는 통계적으로 유의한 영향을 보이지 않았다. 이는 한파일수의 영향이 독립적으로 작용하기보다는, 재난문자 발송과 같은 정책 변수와 결합된 형태로 나타날 가능성을 시사한다.

사회·경제적 변수는 전반적으로 통계적으로 유의한 결과를 보였다. 1인당 GRDP는 환자 발생 확률과 유의한 음(-)의 관계를 보였으며, 이는 지역의 경제적 수준이 높을수록 한랭질환 발생 가능성이 낮아지는 경향이 있음을 시사한다. 또한 1인당 병상 수는 양(+)의 관계를 보였으며, 이는 의료 인프라가 잘 갖춰진 지역에서 환자 발생이 보다 적극적으로 보고될 가능성을 반영한 결과로 해석될 수 있다.⁹⁾ 공원 면적은 환자 발생 확률과 유의한 음(-)의 관계를 보였다. 이는 공원이 한파 위험을 직접적으로 감소시키는 효과로 해석하기보다는, 공원 면적이 높은 지역이 전반적으로 도시 인프라 및 생활환경이 잘 갖춰진 지역일 가능성을 반영한 결과로 이해할 수 있다(Myeong, 2017). 즉, 이러한 지역에서는 한파에 대한 노출 또는 취약성이 상대적으로 낮아 환자 발생 자체는 억제되는 경향이 나타난 것으로 해석된다.

8) 비선형 모형에서 개체 고정효과를 포함할 경우 부수적 모수 문제(incidental parameters problem)가 발생할 수 있다(Chamberlain, 1984). 본 연구에서는 해당 문제와 추정 안정성을 고려하여 최종적으로는 월 고정효과를 포함한 pooled logit 모형을 사용하였다. 따라서 본 모형에서는 해당 문제가 직접적으로 적용되지는 않으나, 지역별 미관측 이질성 가능성은 해석 시 고려할 필요가 있다.

9) 다만 해당 변수는 지역의 의료 수요 및 인프라 수준과 동시에 결정될 가능성이 있어, 결과 해석에는 주의가 필요하다. 또한 설명변수 간 상관관계 및 분산팽창계수(VIF)를 점검한 결과 다중공선성 문제는 크지 않은 것으로 확인되었으며, 관련 결과는 부록에 제시하였다.

4.1.2. 한랭질환 발생 시 환자 수에 대한 효과

다음으로 한랭질환 환자가 발생한 경우에 한하여 환자 수를 분석한 Step 2 결과, 한파쉼터 수용능력과 재난문자 발송 모두 환자 발생 규모와 통계적으로 유의한 관계를 보였다.

먼저 한파쉼터 수용능력(인구 100명당 수용가능 인원 기준)은 환자 수와 유의한 음(-)의 관계를 보였으며, 이는 한파쉼터가 환자 발생 이후 피해 규모를 완화하는 방향으로 작용할 가능성을 시사한다. 또한 발생 여부를 분석한 Step 1에서도 음(-)의 관계가 관찰된 점을 고려할 때, 한파쉼터는 발생 자체를 억제하는 측면에서도 일정 부분 기여할 가능성이 있다.

다만 두 단계의 결과는 종속변수의 성격이 상이하므로

효과의 크기를 직접적으로 비교하기에는 한계가 있으며, 본 연구에서는 한파쉼터가 발생 여부와 발생 규모 양 측면에서 일관된 감소 방향의 연관성을 보인다는 점에 주목하였다. 이러한 결과는 쉼터 이용을 통한 직접적인 보호 효과뿐 아니라, 의료 접근성 변화나 경증 환자의 조기 대응 등 다양한 경로가 혼재되어 나타난 결과일 수 있으며, 본 연구에서는 이를 개별적으로 구분하지 못한다는 점에서 해석에 제약이 존재한다.

재난문자 발송(Warning)은 환자 수와 유의한 음(-)의 관계를 보였으며, 평균 한계효과가 -0.61 수준으로 추정되어, 재난문자 발송 1회 증가 시 기대 환자 수가 평균적으로 약 0.61명 감소하는 것으로 해석할 수 있다. 또한 재난문자 발송과 한파일수 간 상호작용항(Warning×cdays)이 유의하게 나타나, 재난문자의 효과가 한파일수 수준에

Table 2. Two-part model results for cold-related patient occurrence

Variables	(1) Step 1: Probability of positive occurrence		(2) Step 2: Conditional patient count (Y>0)
	(A) No interaction	(B) With interaction	
Shelter	-0.082*** (0.031)	-0.081*** (0.032)	-0.034* (0.020)
Warning	-0.096*** (0.034)	-0.106*** (0.033)	-0.029*** (0.008)
Warning ²	0.005** (0.002)	0.003 (0.002)	0.000 (0.001)
cdays	0.012 (0.022)	-0.003 (0.025)	0.021*** (0.007)
wspd	0.275 (0.196)	0.279 (0.196)	-0.060 (0.047)
ln (elder_share)	-	-	0.135** (0.061)
ln (grdp)	-0.609*** (0.149)	-0.609*** (0.149)	0.026 (0.059)
ln (beds)	0.365** (0.153)	0.364** (0.153)	0.352*** (0.076)
ln (park)	-0.412*** (0.100)	-0.413*** (0.100)	0.055* (.028)
Warning × cdays	-	0.007** (0.003)	0.002** (0.001)
Constant	8.790*** (0.845)	3.352*** (0.745)	-10.056*** (0.291)
Month FE	Yes	Yes	Yes
N	10,533	10,533	6,623
BIC	12,078	12,083	49,338

Note: *p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01. Clustered standard errors at the municipal level are reported in parentheses. A likelihood ratio (LR) test indicates that the interaction model improves model fit at the 10% significance level (p=0.053). Shelter: denotes cold-wave shelter capacity (per 10,000 population), Warning: the number of cold-wave warning messages issued, cdays: the number of cold-wave days, wspd: average wind speed, alone_share: the share of single-elderly households (%), grdp: gross regional domestic product (GRDP) per capita, beds: number of hospital beds per capita, park: park area per capita, Month FE: month fixed effects

따라 달라지는 상태의존적 구조를 보였다. 이는 극한 저온 노출이 증가하는 상황에서 재난문자의 효과가 일정 부분 조정될 수 있음을 시사한다.

이러한 결과는 기존 연구와도 일정 부분 유사하다. 예를 들어, Chau et al. (2009)은 폭염 경고 시스템이 고온 상황에서 개인의 예방 행동을 유도함으로써 사망률을 감소시키는 효과를 가질 수 있음을 제시하였다. 본 연구의 결과 역시 재난문자가 한랭질환 환자 발생 확률과 발생 규모 모두와 음(-)의 연관성을 보인다는 점에서, 기상 재난에 대한 정보 제공형 정책이 건강 피해를 완화하는 데 일정한 역할을 할 가능성을 시사한다.

다만 폭염 경보가 주로 사전적 예방 수단으로 기능하는 것과 달리, 본 연구에서 고려한 한파 적응대책은 재난문자와 한파쉼터를 포함하는 복합적 정책으로 구성되어 있어, 예방적 효과와 사후 대응적 효과가 동시에 작용할 가능성이 있다. 특히 한파쉼터의 경우 환자 발생 이후 피해 규모를 완화하는 방향의 효과가 상대적으로 뚜렷하게 나타나, 한파 대응 정책은 사전 예방과 사후 완화 기능이 혼합된 형태로 작동할 수 있음을 보여준다.

한편, 한파일수(cdays)는 환자 수와 유의한 양(+)의 관계를 보였으며, 평균 한계효과 기준으로도 약 0.57명 증가하는 것으로 나타났다. 이는 극한 저온 노출일수가 증가할수록 한랭질환 환자 규모가 확대되는 경향이 있음을 의미한다. 사회·경제적 변수에서는 일부 이질적인 결과가 확인되었다. 독거노인가구 비율은 환자 수와 유의한 양(+)의 관계를 보였으며, 이는 취약계층 비중이 높은 지역에서 한랭질환 발생 규모가 확대될 가능성을 시사한다. 반면 1인당 GRDP는 통계적으로 유의한 관계를 보이지 않았다. 1인당 병상 수는 환자 수와 유의한 양(+)의 관계를 보였으며, 이는 의료 인프라가 잘 갖춰진 지역에서 환자 발견 및 보고가 보다 적극적으로 이루어질 가능성을 반영한 결과로 해석될 수 있다.

공원 면적 변수는 발생 여부 모형과 달리 환자 수 모형에서는 양(+)의 관계를 보였다. 이는 공원 면적이 높은 지역에서 한파 노출 가능성이 상대적으로 낮아 발생 확률은 감소하는 반면, 일단 환자가 발생한 경우에는 도시 지역의 특성상 환자 규모가 더 크게 관측되는 경향을 시사한다. 특히 공원 면적이 높은 지역은 대체로 도시화 수준이 높은 지역과 관련되어 있으며, 이러한 지역에서는 인구 밀도, 의료 접근성, 환자 보고 체계 등의 요인으로 인해 환자 발생이 보다 적극적으로 집계될 가능성이 있다.

4.2. 지역 특성에 따른 적응대책 효과의 이질성

4.2.1. 고령화 수준에 따른 효과의 이질성

한파 적응대책의 환자 저감 효과가 지역의 인구구조에 따라 달라지는지를 분석하기 위해, 환자 발생 규모 모형(Step 2)에 고령 인구 비율과 정책 변수 간 상호작용항을 포함하였다. 분석 결과, 고령화 수준은 한파쉼터 효과의 크기에 영향을 미치는 조절 요인으로 나타났다.

쉼터 변수의 계수는 음(-)의 값으로 유의하게 나타나(-0.201), 한파쉼터 수용능력의 증가가 전반적으로 한랭질환 환자 수를 줄이는 것으로 나타났다. 한편, 쉼터 수용능력과 고령 인구 비중 간 상호작용항은 양(+)의 방향으로 유의하게 나타나(+0.651), 고령 인구 비중이 증가할수록 쉼터의 환자 저감 효과가 감소하는 것으로 해석된다. 즉, 고령 인구 비중이 높은 지역에서는 동일한 쉼터 확충에도 불구하고 환자 수 감소 효과가 약화되는 경향이 확인된다.

한파재난문자 변수의 계수 역시 음(-)의 부호로 유의하게 나타나(-0.028), 재난문자 발송이 환자 수 감소와 관련되어 있음을 보여준다. 그러나 고령 인구 비중과의 상호작용항은 통계적으로 유의하지 않게 나타나, 고령화 수준에 따른 재난문자 효과의 차이는 제한적인 것으로 해석된다. 한편 재난문자 발송 횟수의 제공항은 양(+)의 방향으로 유의하게 나타나(+0.001), 재난문자 효과와 발송 횟수 간에 비선형적 관계가 존재할 가능성을 시사한다. 메인 모형에서도 해당 비선형 효과가 유의하게 확인된 바 있어, 전반적으로 발송 횟수 증가에 따른 효과 체감 가능성은 일정 부분 지지되는 것으로 해석된다.

4.2.2. 도시화 유형에 따른 효과의 이질성

도시화에 따른 이질성을 분석한 결과, 한파쉼터의 환자 저감 효과는 도시 지역과 비도시 지역 간에 차이를 보였다. 쉼터 수용능력은 전반적으로 환자 수 감소와 음(-)의 관계를 보였으며, 평균 한계효과는 -0.158 수준으로 나타났다. 도시화 변수와의 상호작용항은 양(+)의 방향으로 유의하게 나타나(+0.069), 도시 지역에서 쉼터 수용능력 증가에 따른 환자 저감 효과가 상대적으로 큰 것으로 해석된다. 이는 도시 지역에서 쉼터 접근성 및 이용 가능성이 상대적으로 높은 것에 기인할 가능성이 있다. 또한 쉼터 변수의 제공항은 양(+)의 방향으로 유의하게 나타나(+0.007), 쉼터 확충에 따른 환자 저감 효과가 일정 수준 이후 체감될 수 있음을 보여준다.

Table 3. Heterogeneity effects by regional characteristics

Variables	(3) Senior Share	(4) Urbanization
Shelter	-0.201*** (0.065)	-0.158*** (0.058)
Shelter (sq.)	-	0.007*** (0.003)
Warning	-0.028* (0.014)	-0.032** (0.014)
Warning (sq.)	0.001** (0.000)	0.002*** (0.001)
elder_share	0.784* (0.443)	-
Shelter × elder_share	0.651*** (0.232)	-
Warning × elder_share	-0.009 (0.059)	-
Shelter × urban	-	0.069* (0.040)
Warning × urban	-	-0.009 (0.014)
tmin	-0.073*** (0.009)	-0.073*** (0.009)
wspd	0.136** (0.058)	0.118* (0.061)
urban	-	0.104 (0.141)
ln (alone_share)	-	0.230*** (0.088)
ln (grdp)	0.018 (0.062)	0.042 (0.054)
ln (beds)	0.368*** (0.071)	0.301*** (0.070)
ln (park)	0.075** (0.029)	-
Constant	-10.688*** (0.295)	-10.823*** (0.371)
Month FE	Yes	Yes
N	6,623	6,623
BIC	48,835	48,938

Note: *p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01. Clustered standard errors at the municipal level are reported in parentheses. Shelter: denotes cold-wave shelter capacity (per 10,000 population), Warning: the number of cold-wave warning messages issued, cdays: the number of cold-wave days, wspd: average wind speed, urban: urban classification dummy variable equal to 1 for urban municipalities (Si/Gu) and 0 for rural municipalities (Gun), alone_share: the share of single-elderly households (%), grdp: gross regional domestic product (GRDP) per capita, beds: number of hospital beds per capita, park: park area per capita, Month FE: month fixed effects

10) 평균한계효과는 음이항 모형의 조건부 평균 $\mu_i = E(Y_i|X_i)$ 에 대해 각 정책 변수 X_k 의 부분효과 $\partial \mu_i / \partial X_{ik}$ 를 관측치별로 평가한 후 이를 평균하여 산출하였다.

한편 재난문자 변수 역시 음(-)의 계수로 유의하게 나타나 환자 수 감소 효과를 보였으며(-0.032), 재난문자 발송 횟수의 제공량은 양(+)의 방향으로 유의하게 나타나 (+0.002), 재난문자 효과와 발송 횟수 간 비선형적 관계가 존재할 가능성을 시사한다. 메인 모형에서도 유사한 패턴이 확인된 바 있어, 발송 횟수 증가에 따른 효과 체감 가능성은 전반적으로 지지되는 것으로 해석된다. 다만, 도시화 변수와의 상호작용항은 통계적으로 유의하지 않게 나타나 지역 유형에 따른 효과 차이는 제한적인 것으로 해석된다.

Table 3의 상호작용항 추정 결과를 바탕으로, 정책 효과의 실제 크기 차이를 보다 직관적으로 확인하기 위해 고령화 수준별 및 도시화 유형별 평균 한계효과(average marginal effects)¹⁰⁾를 추가적으로 산출하였으며, 그 결과는 Table 4에 제시하였다.

먼저 고령화 수준별 분석 결과, 한파심터의 경우 고령 인구 비중이 낮은 지역(low aging)에서 환자 저감 효과가 더 크게 나타났으며, 고령 인구 비중이 높은 지역(high aging)에서는 그 효과가 완화된 경향이 확인된다(저고령화 지역 -3.67, 고령화 지역 -1.19). 이는 상호작용항 분석에서 나타난 ‘고령화 수준 증가에 따른 효과 약화’ 패턴과 일관된다.

재난문자 역시 고령 인구 비중이 낮은 지역에서 더 큰 환자 저감 효과를 보였으며(-0.86), 고령 인구 비중이 높은 지역에서는 상대적으로 작은 효과(-0.50)가 나타났다. 다만 이러한 차이는 상호작용항에서 통계적으로 유의하게 확인되지는 않았다는 점에서, 효과의 방향성과 크기 차이는 관찰되나 해당 이질성을 확정적으로 해석하기에는 신중할 필요가 있다.

다음으로, 한파심터의 경우 도시 지역(urban)에서 환자 저감 효과의 한계효과가 더 크게 나타났으며(도시 -2.40, 비도시 -1.54), 이는 상호작용항 기반 분석에서 확인된 이질성 패턴과 일관된다. 반면 재난문자의 경우, 상호작용항에서는 도시와 비도시 간 차이가 통계적으로 유의하게 나타나지 않았으나, 평균 한계효과 기준에서는 도시 지역의 효과(-1.07)가 비도시 지역(-0.29)에 비해 더 크게 나타나는 경향이 관찰된다.

본 연구의 결과는 한파 적응대책이 건강 피해를 완화하는데 기여할 수 있음을 보여준다는 점에서, 무더위심터가 온열질환 환자 저감에 효과가 있음을 제시한 Kim and

Table 4. Average marginal effects by group

	Low aging	High aging	Non-urban	Urban
Shelter	-3.67	-1.19	-1.54	-2.40
Warning	-0.86	-0.50	-0.29	-1.07

Note: Reported values are average marginal effects (AMEs) based on the negative binomial model. Effects represent the change in expected patient counts associated with a one-unit increase in each policy variable. Estimates are computed separately by subgroup.

Lee (2025)와 긴급재난문자가 자연재해 관련 피해액을 감소시키는 데 기여한다는 Song and Jo (2022)와 전반적으로 일치하는 흐름을 보인다. 다만 세부적인 이질성 측면에서는 일부 차이가 관찰된다. Kim and Lee (2025)는 노인 인구 비중이 높은 지역에서 쉼터 효과가 더욱 크게 나타난다고 보고한 반면, 본 연구에서는 고령화 수준이 높은 지역에서 한파쉼터의 효과가 상대적으로 약화되는 경향이 확인되었다. 또한 해당 연구에서는 군 지역에서 통계적으로 유의한 효과가 나타나지 않았으나, 본 연구에서는 도시와 비도시 간 효과 차이가 일부 관찰되는 등 상이한 결과가 나타났다.

5. 정책적 시사점

한파 적응대책은 모든 지역에서 동일한 방식으로 동일한 효과를 발휘하지 않으며, 정책의 효과는 지역 특성과 정책 운영 방식에 따라 차별적으로 나타날 수 있다. 본 연구의 분석 결과를 바탕으로 다음과 같은 정책적 시사점을 도출하였다.

첫째, 한파재난문자는 한랭질환 환자 발생 확률과 발생 규모 모두와 음(-)의 관계를 보였으며, 이는 정보 전달을 통한 예방 행동 유도과 관련된 정책 수단으로서의 역할을 시사한다. 한편 발송 횟수의 제공량이 양(+)의 방향으로 나타난 결과는 발송 횟수 증가에 따른 한계효과가 점차 체감될 가능성을 보여준다. 이러한 결과는 재난문자 정책이 단순한 발송 횟수 확대보다는 전달 방식의 정밀화를 중심으로 운영될 필요가 있음을 시사한다.

예를 들어, 동일한 경고의 반복 발송보다는 한파 강도 및 시기별 위험 수준에 따라 메시지 내용을 차별화하고, 행동요령·취약계층 보호안내·쉼터 정보 등을 구분하여 제공하는 것이 중요하다. 또한 고령층 및 취약계층이 밀집된 지역에서는 문자 중심 전달에 한계를 가질 수 있으므로, 음성 안내, 복지 인력 연계, 지역 단위 직접 전달체계 등과 결합된 맞춤형 정보 전달 전략이 병행될 필요가 있다.

둘째, 한파쉼터는 한랭질환 발생 가능성과 발생 규모 모두를 감소시키는 것으로 나타났다. 이는 물리적 보호 인프라가 한파 노출 자체를 줄이는 동시에, 노출 이후의 건강 피해를 완화하는 복합적 경로를 통해 작용할 가능성을 시사한다. 특히 분석 결과에서는 발생 이후 환자 수를 줄이는 효과가 상대적으로 더 크게 나타나, 쉼터가 보호 인프라로서 피해 규모 완화 기능을 보다 강하게 수행할 가능성이 확인된다. 다만 고령화가 심화된 지역에서는 쉼터의 환자 수 저감 효과가 상대적으로 약화되는 경향이 관찰되었는데, 이는 이동 제약, 접근성 문제, 이용 가능성 등 구조적 요인이 정책 효과를 제약할 가능성을 보여준다. 따라서 단순한 시설 확충뿐 아니라, 접근성 개선, 이용 유도, 지역 내 연계 서비스 강화와 같은 운영 전략이 함께 고려될 필요가 있다.

셋째, 고령화 심화 지역에서 한파쉼터와 재난문자 모두 효과가 상대적으로 약화되는 경향은, 기존 적응대책이 취약계층의 특성을 충분히 반영하지 못할 수 있음을 시사한다. 이에 따라 노인 비중이 높은 지역에서는 기존 정책에 더해 직접 방문 기반의 안부 확인, 음성 안내 중심의 재난 정보 전달, 지역 복지 인력과 연계된 대응체계 구축 등 보다 구체적인 보완 정책 수단이 필요하다.

넷째, 도시화 유형에 따른 분석 결과는 한파쉼터의 효과가 지역의 인프라 환경에 따라 달라질 수 있음을 보여준다. 도시 지역에서는 한파쉼터 외에도 난방이 가능한 공공·민간 공간, 의료 접근성 등 다양한 대체 보호수단이 존재할 가능성이 있으며, 이는 쉼터의 추가적인 효과가 상대적으로 작게 나타나는 배경이 될 수 있다. 이러한 결과는 한파 적응대책이 단일 수단 중심이 아니라, 지역의 기존 인프라 수준과 대체 가능성을 고려한 통합적 대응 전략으로 설계·운영될 필요가 있음을 시사한다.

따라서, 본 연구의 결과는 한파 적응대책이 획일적으로 적용될 경우 지역별 건강 리스크를 충분히 완화하기 어렵다는 점을 보여주며, 정책 효과를 제고하기 위해서는 정책 유형별 역할 구분, 전달 방식의 정교화, 그리고 지역 특성을 반영한 맞춤형 운영 전략이 중요함을 시사한다.

6. 결론

본 연구는 2014년부터 2023년까지의 시군구 단위 월별 자료를 활용하여, 한파 적응대책이 한랭질환 환자 발생에 미치는 영향을 실증적으로 분석하였다. 기존 연구들이 폭염에 비해 상대적으로 주목하지 않았던 한파 건강 리스크

에 초점을 맞추고, 한파쉼터와 재난문자라는 대표적인 적응대책이 환자 발생 확률과 발생 규모의 서로 다른 단계에서 어떻게 작동하는지를 Two-part 모형을 통해 구분하여 분석했다는 점에서 의의를 갖는다.

분석 결과, 정보 전달형 대책인 한파재난문자는 한랭질환 환자 발생 확률 및 발생 규모와 모두 음(-)의 연관성을 보이는 것으로 나타났다. 이는 재난문자 발송이 개인의 위험 인식 및 대응 행동과 관련된 경로를 통해 한랭질환 발생과 연관될 가능성을 시사한다. 다만 이러한 결과는 관측된 변수들을 통제한 조건부 상관관계(association)에 기반한 것으로, 내생성 가능성을 고려할 때 인과적 효과로 해석하는 데에는 한계가 존재한다.

한편, 한파쉼터 수용능력은 환자 발생 확률과 발생 규모 모두에서 유의한 음(-)의 관계를 보이는 것으로 나타났다. 이는 한파쉼터가 단순한 사후 대응 수단에 국한되지 않고, 한랭질환 발생 자체를 억제하는 예방적 기능과 발생 이후 피해 규모를 완화하는 기능을 동시에 수행할 가능성을 시사한다. 이러한 결과는 적응대책의 효과가 발생 단계별로 분리되기보다는 복합적인 경로를 통해 나타날 수 있음을 보여준다.

또한, 재난문자 발송 횟수의 제공량이 양(+)의 방향을 보인 결과는 발송 횟수 증가에 따라 한계효과가 점차 체감될 가능성을 시사한다. 다만 추정된 비선형성은 주어진 자료 범위 내에서 해석되어야 하며, 실제 정책 효과는 발송 방식, 전달 대상, 지역 특성 등에 따라 달라질 수 있다.

지역 특성에 따른 이질성 분석 결과, 한파 적응대책의 효과는 고령화 수준과 도시화 유형에 따라 차별적으로 나타났다. 고령인구 비중이 높은 지역에서는 한파쉼터와 재난문자 모두 환자 수 저감 효과가 상대적으로 약화되는 경향이 관찰되었으며, 이는 이동 제약, 정보 접근성, 사회적 지원 체계 등 구조적 요인이 정책의 실효성을 제약할 가능성을 시사한다.

도시화 유형에 따른 분석에서는 한파쉼터의 효과가 지역의 인프라 환경에 따라 달라질 수 있음이 확인되었다. 이는 도시 지역에서 난방이 가능한 공공·민간 공간, 의료 접근성 등 다양한 대체 보호수단이 상대적으로 잘 갖추어져 있을 가능성 또한 함께 반영된 결과로 해석할 수 있다. 즉, 도시 지역에서 관찰된 상대적으로 작은 효과는 쉼터 이용 제약만이 아니라 기존 인프라의 풍부성과 대체 가능성에 의해 설명될 수 있다.

이러한 결과는 한파 적응대책이 지역별 특성과 정책 환경에 따라 상이하게 작동할 수 있음을 보여주며, 정책 효

과는 개별 수단의 독립적 효과보다는 지역의 전반적인 대응 역량과 결합된 형태로 나타날 가능성이 있음을 시사한다. 이는 적절한 정책 설계와 취약계층을 고려한 타겟팅이 이루어질 경우 한파로 인한 건강 피해를 완화할 수 있음을 제시한 기존 연구의 결과와도 정합적인 흐름을 보인다(Chalabi et al., 2016). 다만, 본 연구의 결과는 특정 정책의 순수한 인과적 효과로 해석하기보다는, 지역 한파 대응체계 내에서의 조건부 연관성을 반영한 결과로 이해할 필요가 있다.

본 연구는 한파 적응대책의 효과를 실증적으로 규명했다는 점에서 의의를 가지지만, 몇 가지 한계점 또한 존재한다. 첫째, 한파쉼터의 효과를 분석함에 있어 실제 이용 실적이 아닌 수용 가능 인원수를 대리변수로 사용하였다. 시설이 충분히 공급되었다라든가 접근성 제약이나 정보 부족으로 실제 이용률이 낮을 경우 정책의 실효성은 달라질 수 있으나, 자료의 한계로 인해 이러한 이용 행태를 충분히 반영하지 못했다. 둘째, 난방비 지원이나 에너지 바우처와 같은 경제적 지원 정책을 분석에 포함하지 못했다는 점이다. 특히 취약계층의 경우 난방비 부담이 한랭질환 노출의 중요한 요인이 될 수 있으나, 시군구 단위의 일관된 자료 구축에 한계가 있어 모형에 포함하지 못하였다. 셋째, 본 연구는 동상과 저체온증 등 직접적인 한랭질환에 초점을 맞추었으며, 한파로 인한 심혈관계, 호흡기계 질환과 같은 간접적 건강 영향은 분석 범위에 포함하지 못하였다. 따라서 분석 대상 질환을 확장하여 한파가 초래하는 총 건강 부담을 보다 포괄적으로 평가할 필요가 있다. 마지막으로, 재난문자 발송이나 쉼터 확충이 지역의 전반적 대응 역량과 동시에 결정될 가능성이 있어 내생성 문제를 완전히 배제하기 어렵다. 이에 따라 향후 연구에서는 도구변수 접근이나 제도 변화 등을 활용하여 인과 식별을 보다 정교하게 수행할 필요가 있다.

향후 연구에서는 이러한 한계를 보완하여, 한파 적응대책의 실제 이용 행태를 반영한 미시적 분석과 함께 적응대책의 비용-편익 분석을 통해 경제적 효율성을 평가할 필요가 있다. 또한 본 연구는 정책 변수의 변동성과 추정치의 안정성을 고려하여 월 단위 자료를 활용하였으나, 한랭질환의 급성 반응 특성을 보다 정밀하게 반영하기 위해서는 일별 자료를 활용한 분석이 필요하다. 이에 따라 향후 연구에서는 일별 자료를 기반으로 단기적 반응을 추가적으로 검토할 필요가 있다. 이러한 후속 연구는 기후변화로 인한 한파 리스크에 대응하기 위한 보다 정교하고 실효적인 정책 설계에 기여할 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2022R1A2C2093163)의 지원과, 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 「신기후체제 대응 환경기술개발사업(RS-2022-KE002152)」의 지원을 받아 수행되었다.

References

- Ahn D, Ahn Y, Jung E, Oh J. 2024. The mid- and long-term plan for climate health (2024–2028) in Korea Disease Control and Prevention Agency. *Public Health Wkly Rep* 17: 1534–1547. doi: 10.56786/PHW R.2024.17.36.2
- Ahn Y, Chae Y. 2018. Analyzing spatial equality of cooling service shelters, central district of Seoul metropolitan city, South Korea. *Spatial Inf Res* 26: 619–627. doi: 10.1007/s41324-018-0206-y
- Almendra R, Santana P, Vasconcelos J. 2017. Evidence of social deprivation on the spatial patterns of excess winter mortality. *Int J Public Health* 62: 849–856. doi: 10.1007/s00038-017-0964-7
- Chae SM, Kim D. 2020. Research trends in agenda-setting for climate change adaptation policy in the public health sector in Korea. *J Prev Med Public Health* 53: 3–14. doi: 10.3961/jpmph.19.326
- Chalabi Z, Hajat S, Wilkinson P, Erens B, Jones L, Mays N. 2016. Evaluation of the cold weather plan for England: Modelling of cost-effectiveness. *Public Health* 137: 13–19. doi: 10.1016/j.puhe.2015.11.013.
- Chamberlain G. 1984. Panel data. In: Griliches Z, Intriligator M (eds). *Handbook of econometrics*. vol. 2. New York: Elsevier.
- Chau PH, Chan KC, Woo J. 2009. Hot weather warning might help to reduce elderly mortality in Hong Kong. *Int J Biometeorol* 53: 461–468. doi: 10.1007/s00484-009-0232-5
- Chirakijja J, Jayachandran S, Ong P. 2024. The mortality effects of winter heating prices. *Econ J* 134: 402–417. doi: 10.1093/ej/uead072
- Chung Y, Noh H, Honda Y, Hashizume M, Bell ML, Guo YLL, Kim H. 2017. Temporal changes in mortality related to extreme temperatures for 15 cities in Northeast Asia: adaptation to heat and maladaptation to cold. *Am J Epidemiol* 185: 298–311. doi: 10.1093/aje/kww199
- Clarke B, Otto F, Stuart-Smith R, Harrington L. 2022. Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective. *Environ Res Clim* 1: 012001. doi: 10.1088/2752-5295/ac6e7d
- Cohen J, Agel L, Barlow M, Garfinkel CI, White I. 2021. Linking Arctic variability and change with extreme winter weather in the United States. *Science* 373: 1116–1121. doi: 10.1126/science.abi9167
- Conlon KC, Rajkovich NB, White-Newsome JL, Larsen L, O'Neill MS. 2011. Preventing cold-related morbidity and mortality in a changing climate. *Maturitas* 69: 197–202. doi: 10.1016/j.maturitas.2011.04.004
- Coumou D, Rahmstorf S. 2012. A decade of weather extremes. *Nat Clim Change* 2: 491–496. doi: 10.1038/nclimate1452
- De Schrijver E, Sivaraj S, Raible CC, Franco OH, Chen K, Vicedo-Cabrera AM. 2023. Nationwide projections of heat- and cold-related mortality impacts under various climate change and population development scenarios in Switzerland. *Environ Res Lett* doi: 10.1088/1748-9326/ace7e1
- Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, Lavigne E, Zanobetti A, Schwartz J, Tobias A, Tong S, Rocklöv J, Forsberg B, et al. 2015. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multicountry observational study. *Lancet* 386: 369–375. doi: 10.1016/S0140-6736(14)62114-0
- Hong Y, Jeong J, Kim W, Yoon D. 2023. Effectiveness of heatwave emergency alert messages through analysis of floating population (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitig* 23: 77–90. doi: 10.9798/KOSHAM.2023.23.6.77
- Howden-Chapman P, Matheson A, Crane J, Viggers H,

- Cunningham M, Blakely T, Cunningham C, Woodward A, Saville-Smith K, O'Dea D, et al. 2007. Effect of insulating existing houses on health inequality: Cluster randomised study in the community. *BMJ* 334: 460. doi: 10.1136/bmj.39070.573032.80
- Iparraquirre J. 2015. Have winter fuel payments reduced excess winter mortality in England and Wales? *J Public Health* 37: 26-33. doi: 10.1093/pubmed/flu063
- Kang S, Kim J, Jeon S, Han J, Kim Y. 2024. Locations of cooling centers according to spatial patterns of heatwave vulnerability and elderly inhabitants of administrative districts in Seoul (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 15: 1001-1022. doi: 10.15531/KSCCR.2024.15.6.1001
- Kim H, Shoji Y, Tsuge T, Aikoh T, Kuriyama K. 2021. Understanding recreation demands and visitor characteristics of urban green spaces: A use of the zero-inflated negative binomial model. *Urban For Urban Greening* 65: 127332. doi: 10.1016/j.ufug.2021.127332
- Kim I, Bahk J, Yoon TH, Yun SC, Khang YH. 2017. Income differences in smoking prevalences in 245 districts of South Korea: Patterns by area deprivation and urbanity, 2008-2014. *J Prev Med Public Health* 50: 100-126. doi: 10.3961/jpmph.16.069
- Kim S, Lee D. 2025. Effects of the local government's heatwave response facility on the reduction of heat-related patients: Focusing on cooling shelters (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitig* 25: 87-96. doi: 10.9798/KOSHAM.2025.25.5.87
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2021. Monthly climate analysis report: December 2021. Seoul, Korea: Korea Meteorological Administration.
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2025. Climate characteristics of winter 2024/25: Unusual late-winter cold and precipitation less than half of normal. Seoul, Korea: Korea Meteorological Administration. Press release.
- Lee H, Byun Y, Chang S, Choi SJ. 2021. Effect of problematic frequency types of the Korean Public Alert Service (KPAS) on adjustment expectation (in Korean with English abstract). *J Broadcast Eng* 26: 799-808. doi: 10.5909/JBE.2021.26.6.799
- Lee Y, Choi D, Ko M. 2022. Application and case study of spatial statistical interpolation technology for estimating the photovoltaic power plant solar radiation in an arbitrary location (in Korean with English abstract). *J Archit Inst Korea* 38: 225-233. doi: 10.5659/JAIK.2022.38.9.225
- Li C, Wu J, Zhang Y, Xu C, Tao Z. 2025. Effects of wind direction on human physiological responses and thermal perception during extreme cold exposure(-15 °C). *Build Environ* 283: 113412. doi: 10.1016/j.buildenv.2025.113412
- Liddell C, Morris C. 2010. Fuel poverty and human health: A review of recent evidence. *Energy Policy* 38: 2987-2997. doi: 10.1016/j.enpol.2010.01.037
- Lym H, Lym Y. 2025. A Bayesian two-part model for analyzing EQ-5D health utility: Addressing ceiling effects, skewness, and negative values. *Crisisonomy* 21: 87-102. doi: 10.14251/crisisonomy.2025.21.9.87
- Myeong S. 2017. Green space accessibility analysis in terms of environmental justice. Korea Environment Institute (KEI). Research Report.
- Oh B, Moon Y. 2023. The impact of long-term care insurance on healthcare utilization of the elderly (in Korean with English abstract). *J Korean Econ Stud* 41: 5-24. doi: 10.46665/jkes.2023.12.41.4.5
- Park SJ, Kim DW, Deo RC, Lee JS. 2018. Mapping hypothermia death vulnerability in Korea. *Int J Disaster Risk Reduct* 31: 668-678. doi: 10.1016/j.ijdrr.2018.06.016
- Song H, Jo H. 2022. The economic analysis of the disaster alerts messages (in Korean with English abstract). *Korean J Public Finance* 15: 47-72.
- Statistics Korea. 2023. Population projections: 2022-2072. Daejeon, Korea: Statistics Korea.
- Wu X, Luo M, Lau GN-C, Zhang W, Wang L, Liu Z, Lin L, Wang Y, Ge E, Li J, et al. 2025. Rapid flips between warm and cold extremes in a warming world.

Nat Commun 16: 123. doi: 10.1038/s41467-025-58544-5

Yoon S, Nam K. 2022. Information types and characteristics of emergency alert messages during COVID-19: Evidence from Seoul (in Korean with English abstract). J Intell Inform Syst 28: 45-68. doi: 10.13088/jiis.2022.28.1.045

부록

Table A1. Results of alternative model analysis for robustness checks

Classification	OLS (Log-Normal)	Poisson	Negative Binomial (ZINB)
Shelter	-0.0156*** (0.0056)	-0.0142** (0.0071)	-0.0168*** (0.0062)
Warning	-0.0237*** (0.0069)	-0.0154** (0.0067)	-0.0175*** (0.0065)
Warning (sq.)	0.0011** (0.0005)	0.0008* (0.0004)	0.0010* (0.0005)
tmin	-0.1509*** (0.0052)	-0.1718*** (0.0040)	-0.1775*** (0.0043)
wspd	0.2677*** (0.0434)	0.3405*** (0.0302)	0.2874*** (0.0293)
ln (grdp)	0.2344*** (0.0777)	0.5047*** (0.1153)	0.3586*** (0.0975)
ln (bed)	-0.1022 (0.0758)	-0.4412*** (0.1595)	-0.2402* (0.1306)
ln (park)	0.0961*** (0.0282)	0.0814*** (0.0212)	0.0953*** (0.0241)
BIC	13,797.2	64,462.8	53,871.8

Note: *p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01; For the Poisson and Negative Binomial models, ln(Population) was used as an offset. Zero values are included in the Negative Binomial model.

Table A2. Descriptive statistics

Variable	Description	Unit	Mean	SD	Min	Max
patient	Occurrence of cold-related illnesses	(0,1)	0.633	0.482	0	1
Shelter	Heating shelter capacity per 100 people	persons	0.328	1.722	0	25.116
Warning	Frequency of cold wave warnings	count	0.554	1.760	0	30
cdays	Number of cold wave days	days	1.180	2.877	0	23
tmin	Minimum Temperature	°C	-2.055	4.326	-14.430	10.997
wspd	Monthly average wind speed	m/s	1.926	0.594	0.659	4.877
grdp	Gross Regional Domestic Product per capita	million KRW	3.470	0.565	2.285	5.879
fin	Financial independence rate	%	2.812	0.592	1.361	4.233
beds	Number of hospital beds per capita	beds per person	2.498	0.714	-1.609	4.250
park	Park area per capita	m ²	2.389	1.171	-3.487	5.229
alone_share	Share of single elderly households	%	2.308	0.536	0.993	3.314
urban_area	Urban land share	%	170.224	150.823	22.760	1,841.960

Note: Descriptive statistics are calculated using the full sample (including zero and positive observations) corresponding to Step 1 of the two-part model. The conditional sample used in Step 2 (Y>0) is not reflected in this table.

Table A3. Correlation matrix

	Shelter	Warning	tmin	cdays	wspd	alone_share	grdp	beds	park
Shelter	1.000	0.073	0.054	0.016	0.057	0.160	0.171	0.032	-0.014
Warning	0.073	1.000	-0.194	0.396	0.031	0.089	0.096	-0.026	-0.033
tmin	0.054	-0.194	1.000	-0.470	0.258	0.069	0.021	0.064	-0.013
cdays	0.016	0.396	-0.470	1.000	0.035	0.040	0.030	-0.117	0.071
wspd	0.057	0.031	0.258	0.035	1.000	-0.002	0.029	0.096	-0.065
alone_share	0.160	0.089	0.069	0.040	-0.002	1.000	0.263	0.125	0.162
grdp	0.171	0.096	0.021	0.030	0.029	0.263	1.000	-0.037	0.119
beds	0.032	-0.026	0.064	-0.117	0.096	0.125	-0.037	1.000	-0.129
park	-0.014	-0.033	-0.013	0.071	-0.065	0.162	0.119	-0.129	1.000

Note: Shelter: denotes cold-wave shelter capacity (per 10,000 population), Warning: the number of cold-wave warning messages issued, cdays: the number of cold-wave days, wspd: average wind speed, alone_share: the share of single-elderly households (%), grdp: gross regional domestic product (GRDP) per capita, beds: number of hospital beds per capita, park: park area per capita

Table A4. Variance inflation factors (VIF)

Variable	VIF
Shelter	1.025
Warning	2.158
Warning (squared)	1.998
cdays	1.217
wspd	1.035
ln (alone_share)	1.148
ln (grdp)	1.033
ln (beds)	1.125
ln (park)	1.032
factor (month)	1.028

Note: Reported values are generalized variance inflation factors (GVIFs). All GVIF values are below the conventional threshold of 5, indicating no evidence of severe multicollinearity among the explanatory variables. Shelter: denotes cold-wave shelter capacity (per 10,000 population), Warning: the number of cold-wave warning messages issued, cdays: the number of cold-wave days, wspd: average wind speed, alone_share: the share of single-elderly households (%), grdp: gross regional domestic product (GRDP) per capita, beds: number of hospital beds per capita, park: park area per capita

Table A5. Two-part model results for cold-related patient occurrence with lagged policy variables

Variables	(1) Step 1: Probability of positive occurrence		(2) Step 2: Conditional patient count (Y>0)
	(A) No interaction	(B) With interaction	
Sheltert _{t-1}	0.027 (0.031)	0.029 (0.031)	-0.034* (0.019)
Warningt _{t-1}	-0.074* (0.042)	-0.116** (0.047)	-0.058** (0.012)
(Warningt _{t-1}) ²	0.001 (0.003)	0.003 (0.003)	0.001** (0.001)
cdays	0.037 (0.019)	0.019 (0.022)	0.026*** (0.006)
wspd	0.081 (0.172)	0.085 (0.172)	-0.061 (0.050)
ln (alone_share)	-	-	0.019 (0.113)
ln (fin)	2.399*** (0.215)	2.400*** (0.215)	-0.070 (0.110)
ln (grdp)	-0.429** (0.171)	-0.429** (0.171)	0.027 (0.064)
ln (beds)	0.733*** (0.157)	0.732*** (0.157)	0.331*** (0.007)
ln (urban_area)	-1.030*** (0.152)	-1.031*** (0.152)	0.102** (0.047)
Warning × cdays	-	0.013*** (0.004)	0.001 (0.001)
Constant	0.014 (1.049)	0.035 (1.049)	-9.898*** (0.542)
Month FE	Yes	Yes	Yes
N	10,533	10,533	6,623
BIC	8,069	8,072	49,319

Note: *p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01. Clustered standard errors at the municipal level are reported in parentheses. Shelter: denotes cold-wave shelter capacity (per 10,000 population), Warning: the number of cold-wave warning messages issued, cdays: the number of cold-wave days, wspd: average wind speed, alone_share: the share of single-elderly households (%), grdp: gross regional domestic product (GRDP) per capita, beds: number of hospital beds per capita, urban_area: the share of urbanized land area (%), Month FE: month fixed effects